



长周期波大输沙量条件下海港平面布置方案

厉泽逸，刘均卫

(长江勘测规划设计研究有限责任公司，湖北 武汉 430010)

摘要：随着“一带一路”的建设，西非、地中海以及印度洋沿岸等海域由于其特定的自然条件导致具有明显的长周期波浪成分，且已对港口工程建设产生了严重影响。结合非洲某港口工程实例，其具有波浪周期长以及沿岸输沙量大两大特点；长周期波及大输沙量易引起港内泊稳条件差、泥沙淤积重，外海船舶施工风险大等问题，经对其平面布置方案研究后，决定采用挖入式港池布置方案，并通过波浪泥沙数学模型及物理模型试验等研究方法进行验证。结果表明，该挖入式港池方案能较好地解决以上问题。

关键词：挖入式港池；长周期波；大输沙量；防波堤；数模计算；物模试验

中图分类号：U 651

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)02-0058-07

General layout scheme of harbor under condition of long-period wave and large sediment discharge

LI Ze-yi, LIU Jun-wei

(Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: With the construction of “the Belt and Road”, the coastal areas of West Africa, Mediterranean and Indian Ocean have obvious long-period wave components due to their specific natural conditions, which have a serious impact on port engineering construction. The example of a port in Africa in this paper has the characteristics of long wave period and large coastal sediment discharge, and long period wave and large sediment discharge are easy to cause problems such as poor mooring stability conditions in the port, heavy sediment deposition, and high construction risks of offshore ships. After studying the general layout scheme, we decide to adopt the layout scheme of excavated-in harbor basin, and verify the scheme by the research methods of wave-sediment mathematical model and physical model test. The results show that the excavated-in harbor basin scheme can better solve the above problems.

Keywords: excavated-in harbor basin; long-period wave; large sediment discharge; breakwater; mathematical model calculation; physical model test

随着“一带一路”的建设，西非、地中海以及印度洋沿岸等海域由于其特定的气候以及海底地形导致具有明显的长周期波浪成分，且已对港池泊稳及船舶施工产生了严重影响。例如，天津远洋公司1万吨级轮船“云台山”号于1984年12月底靠泊西非友谊港时，在3 d时间内曾先后断缆20次。因此研究长周期波浪条件下海港工程平面

布置方案对于响应国家发展战略、实现港航业务国际化具有重要意义。

国内港口工程设计的波浪周期一般小于12 s，沿岸输沙量一般小于30万m³/a。本文结合的非洲某港口工程特点为：直面大西洋，无任何掩护条件；设计波浪周期长，为23 s，该设计波浪周期已超越我国港口工程设计规范范围；典型的沙质海岸，

沿岸输沙量大, 达 100 万 m^3/a 。

本文针对该港口工程特点, 对其平面布置方案进行研究, 结合波浪泥沙数学模型及物理模型试验等研究方法, 提出合理的平面布置方案, 以改善其港内泊稳条件、减少进港航道和港池淤积, 从而减少外海船舶施工风险, 为类似海况条件下的海港工程的设计提供借鉴。

1 工程概况

1.1 建设规模

本工程建设 1 个 3 万吨级件杂泊位, 440 m 长的 3 000 吨级件杂泊位, 460 m 长的 700 吨级渔船泊位等^[1-2]。

1.2 设计波浪要素

拟建工程海区主导波型是以涌浪为主的混合

浪, 出现频率高达 70%。港外波浪频谱图上存在着 2 个峰值带, 为 1 个主峰带和 1 个次峰带。主峰带表征了波浪能量主要集中在 10~15 s 周期的波浪上, 为最常见的涌浪; 次峰带表明波浪中存在着另一个能量区, 它对应的波浪周期为 30~100 s。

根据本工程波浪数学模型计算, 拟建工程海区每年 12 月—翌年 3 月为大浪期, 波向偏 NW, 每年 7、8 月为小浪期, 会出现偏 SW 向波; 外海大浪方向一般出现在 WNW—NNW 向范围内, 统计表明这 3 个方向的波浪总出现频率约为 87%。防波堤堤头泥面高程约 -11 m 处的设计波要素见表 1, 其中 WNW、W、WSW 向波浪 50 a 一遇的平均周期分别为 23.0、16.1、16.1 s, 2 a 一遇的平均周期分别为 18.9、13.0、13.0 s。

表 1 防波堤堤头设计波浪要素

波向	水位	50 a 一遇			2 a 一遇		
		$H_{1\%}/m$	$H_{5\%}/m$	$H_{13\%}/m$	$H_{1\%}/m$	$H_{5\%}/m$	$H_{13\%}/m$
WNW	极端高水位	6.31	5.35	4.62	—	—	—
	设计高水位	6.27	5.33	4.61	5.06	4.25	3.64
	设计低水位	6.14	5.25	4.57	—	—	—
	极端低水位	6.09	5.22	4.55	—	—	—
W	极端高水位	4.92	4.12	3.52	—	—	—
	设计高水位	4.90	4.11	3.51	3.51	2.91	2.46
	设计低水位	4.81	4.05	3.48	—	—	—
	极端低水位	4.79	4.04	3.47	—	—	—
WSW	极端高水位	4.90	4.10	3.50	—	—	—
	设计高水位	4.87	4.08	3.49	3.49	2.89	2.44
	极端低水位	4.76	4.02	3.45	—	—	—

1.3 潮流及海流

工程区平均潮差为 1.05 m; 实测潮流最大垂线平均流速为 0.33 m/s, 潮流总体上呈涨潮往北、落潮往南的流向趋势; 海流绝大部分时间为由北向南, 平均流速小于 0.26 m/s。工程区潮汐、潮流、海流动力较弱, 三者并非本海域的主要动力。

1.4 工程地质及工程泥沙

1.4.1 工程地质

港区揭露第四系地层岩性主要分为中砂、含贝壳中砂、细砂、青灰色细砂、含贝壳胶结团块细砂、含贝壳胶结细砂、黏土和粉砂。工程区

地震基本烈度小于或等于 VI 度。

1.4.2 底质泥沙特性

工程区 -13 m 以外的深水区泥沙较细, 分选性差, 表明深水区波浪作用较弱, 床面处于相对平静的环境; -10 m 以内的近岸区泥沙逐步粗化, 分选性总体较好, 表明近岸区波浪作用显著。

1.4.3 沿岸泥沙运动特征

工程区海域泥沙来源于上游海岸侵蚀, 近岸泥沙运动主要发生在斜向波作用下的波浪破碎带内, 泥沙运动形式以沿岸由北向南悬移质输运为主。经对本工程海岸计算及多年泥沙运动观测, 本工程沿岸输沙量约为 100 万 m^3/a 。

2 平面布置方案研究

本工程直面大西洋，港址处无任何掩护条件，典型的沙质海岸，具有波浪周期长及沿岸输沙量大两大特点。其设计波浪周期长达 23 s，外海大浪方向一般出现在 WNW—NNW 向范围内，这 3 个方向的波浪出现频率约为 87%；沿岸输沙量大，达 100 万 m^3/a ，且输沙方向为单一的从北向南方。另由于资金有限，要求进港航道及港池 10 a 内的淤积不影响港口正常运营，10 a 以后，再另行采取工程措施。

港口工程平面布置方案有顺岸式、突堤式、挖入式、岛式布置等形式。根据本工程自然条件特点及业主要求，如采用顺岸式或岛式布置形式，则码头水工建筑物均须向外海布设，同时在码头水工建筑物以外均须修建防波堤以满足港内的泊稳条件，这两种布置形式明显不具备经济性，不予考虑。

我国《港口与航道水文规范》^[3]规定：码头岸线的布置应充分利用自然水深，宜避免在浅滩上开挖深港池；只有一个方向有较强泥沙来源的沙质海岸港，可在沙源来向的一侧布置单突堤，单突堤的根部大致与岸线垂直，由岸伸出一定距离后折向港区一侧，突堤应伸至较大波浪的破碎带以外。因此，根据本工程自然条件，《港口与航道水文规范》推荐单突堤布置形式。经研究，本工程可采用单突堤或挖入式港池布置形式。

2.1 单突堤布置方案

按我国《港口与航道水文规范》，结合当地自然条件，采用单突堤布置方案，见图 1。该方案布置总长约 1 550 m 的单突堤，由 4 段折线组成，从单突堤根部约 250 m 起依次向海侧布置 460 m 长的渔泊位、440 m 长的 3 000 吨级件杂泊位、220 m 长 3 万吨级件杂泊位。另考虑本工程输沙方向为单一的从北向南方向，工程实施后，由于单突堤对沿岸输沙的阻挡，必将呈现单突堤北侧泥沙淤积，单突堤南侧岸线冲刷的特点，因此，在单突堤以南布置 T 形丁坝，以保护港区以南的岸线。



图 1 单突堤布置方案

该方案与我国援非的友谊港单突堤布置形式类似，主要缺点为：

1) 港内泊稳条件差。由于我国沿海港口设计波浪周期一般小于 12 s，而本工程设计波浪周期为 23 s，已超越我国港口工程设计规范的范围。长周期波具有波速大、能量大的特点，对港内的泊稳条件极为不利，易产生船舶运动量大并发生断缆现象，从而影响港口的作业安全。本方案对频率较高的偏北向波浪有一定掩护，但对频率较低的偏南向波浪掩护较差。前文提到的“云台山号”3 d 内先后断缆 20 次就是一个典型的例子。

2) 工程造价高。坦赞铁路和友谊港是 20 世纪我国两大援非工程，投资巨大。西非等落后地区由于经济发展水平低下，建筑材料匮乏。目前，西非大部分落后地区钢材依靠进口，石料一般在数百公里以外，沙主要采用品质较差的沙漠沙(特细沙)；有合资生产的水泥，但价格较贵。本方案单突堤长达 1 550 m，大多位于水深浪大处，水工建筑物工程量大。如水工建筑物采用沉箱方案，则需要建设沉箱预制厂及其配套的下水设施，临时工程投资巨大；如水工建筑物采用高桩梁板结构+抛石方案，则需要搭建临时施工栈桥，临时工程投资同样巨大。因此，本方案水工建筑物和临时工程投资均较大，工程造价高。

3) 施工风险大。本方案水工建筑物工程量大，按国内经验，采用船机施工最为方便。但由于波

浪周期长, 处于外海条件下的施工船舶, 存在极大的施工风险, 国内外均有报道在外海长周期波条件下作业的勘察船舶或施工船舶搁浅损毁案例。因此, 本方案水工建筑物外海施工存在极大的施工风险, 除非采取投资巨大的临时施工措施。

4) 港池淤积严重。由于工程区石料匮乏, 友谊港防波堤当年采用了四面块体堤心代替高价格的抛石, 这种四面块体堤心空隙率较高, 长周期波具有极强的穿透防波堤的能力, 因此友谊港在建成初期港池淤积严重。本方案单突堤须采取工程措施, 以减少港池淤积。

2.2 挖入式港池布置方案

由于常规的单突堤布置方案存在上述缺点,

本工程在总结友谊港经验的基础上, 经对其平面布置进行多方案研究后, 最后决定采用挖入式港池布置方案, 见图2。本方案挖入式港池呈凸字形, 南北最大长度约700 m, 东西最大宽度约750 m, 港池水域总面积约40万m²。港池南侧布置220 m长3万吨级件杂泊位; 港池西侧布置460 m长的渔船泊位; 港池北侧设2座110 m长突堤, 突堤两侧均布置3 000吨级件杂泊位, 总长440 m; 渔码头距海岸线约280 m; 港池东侧为预留发展区。港池口门外北侧设1座780 m长直线形防波堤, 以改善进港航道的航行条件和港池的泊稳条件; 并对由北向南的沿岸输沙进行拦截; 同时在港池口门外南侧布置T形丁坝, 以有效防护丁坝与航道间岸滩。

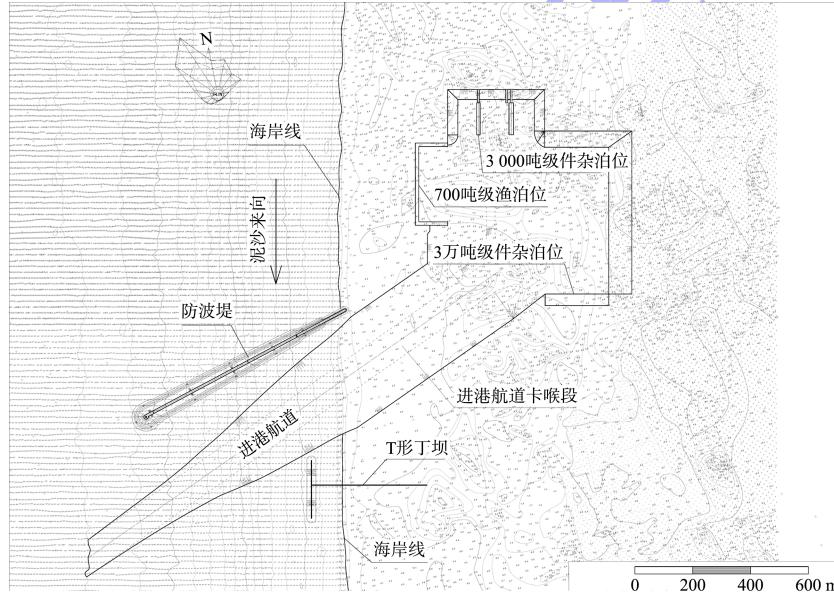


图2 挖入式港池布置方案

该方案主要特点为:

1) 港内泊稳条件好。本方案的长周期波经防波堤掩护, 并经进港航道边坡对进入港池的波浪折射后, 波高有较大幅度的减小, 港内泊稳条件较好。

2) 工程造价低。本方案各码头水工建筑物从外海移至开挖的港池内, 由于港池内波高有较大幅度的减小, 故能节省较大的工程量及投资; 本方案最大的缺点是开挖工程量较大, 但其超过80%为陆上开挖, 可用挖机或吸泥泵开挖, 单价较低。因此, 本方案挖方增加的投资不大, 对比单突堤方案节省了投资巨大的临时工程如沉箱预

制厂或施工栈桥等。因此, 本方案相对单突堤布置方案工程造价大幅降低, 据测算, 比单突堤布置方案节约投资超过60%。

3) 施工风险小。由于本方案各码头水工建筑物位于港池内, 具备干地施工条件, 仅在施工期间进行降水处理, 待港池内的水工建筑物施工完成后, 再挖掉口门处的土体放水。本方案防波堤较短且位于水深相对较浅处, 工程量不大, 由于在长周期波外海无掩护恶劣条件下的施工船舶存在极大的施工风险, 可采用陆推法的抛石斜坡堤结构, 该结构形式安全可靠^[4]。本方案仅进港航道进口段需要挖泥船开挖施工, 工程量较小且可

在防波堤形成掩护后施工。因此，风险小，并能节省工期。

4) 进港航道及港池淤积小。在长周期波条件下，针对抛石斜坡堤中的堤心石，可控制堤心石各粒径块石的级配减小空隙率，以解决堤心石透浪透沙问题，本方案进港航道及港池淤积小。

5) 未来发展空间大。本方案东侧及北侧东部为未来展区，发展空间较大。

2.3 方案比选及注意事项

2.3.1 方案比选

总平面布置方案比较见表 2。经比较后，本工程最后决定采用挖入式港池布置方案。

表 2 总平面布置方案比较

布置方案	优点	缺点
单突堤	土石方开挖量小；不易产生共振现象	港内泊稳条件差；工程造价高；施工风险大；港池淤积严重；未来发展空间小
挖入式港池	港内泊稳条件好；工程造价低；施工风险小；进港航道及港池淤积小；未来发展空间大	土石方开挖量大；布置不当将产生共振

2.3.2 注意事项

在西非等长周期波条件的地区采用挖入式港池方案，具有较好的经济性，但港池内的水体存在共振的风险。布置时须优化港池水域大小及形状、防波堤布置、口门位置及宽度等，并通过模型试验验证。

张翔等^[5]进行了长周期波浪激发矩形港池多模态共振研究，该研究表明：长和宽接近的矩形港池存在横向、纵向及横纵向混合共振模态，斜向波浪会激发港池的横向共振模态，其放大因子受入射角度影响较大，而纵向共振模态的放大因子受入射角度影响较小。口门宽度对港池的共振模态个数与放大因子均有影响，随着口门宽度增加，各阶模态放大因子减小。口门位置对纯横向以及纯纵向共振的模式有显著影响，而对横、纵向混合模态影响较小。各阶模态放大因子的大小和波节线、波腹线与口门的相对位置密切相关。

吴善翔等^[6]进行了美国 Nantucket 岛长周期水波共振特征研究，该研究表明：美国东海岸地区是世界上气象海啸事件频发地区之一，这种由气象扰动产生的长周期波浪与近岸地形相互作用会激发长周期水波共振，威胁船舶航行与停泊安全；Nantucket 岛周围的长周期水波共振的形成原因并不是孤立的，气象海啸与浅水地区复杂的地形相互作用会产生驻波或边缘波，使得一些特定周期的波浪能量增加并导致海岸灾害的发生。

3 港池布置方案相关模型试验

3.1 波浪数模计算结果

我国《海港总体设计规范》^[7]规定：受长周期波或平均周期大于 9 s 的波浪影响，或流速较大的开敞式码头，宜通过模拟试验验证总体布局和设计参数取值的合理性，确定优选方案。

本工程针对上述挖入式港池布置方案进行了波浪数模计算^[8]，其结果为：1) 防波堤对外海波浪向港内传播的掩护效果明显，航道对波浪起发散作用，波浪折射出航道，航道内波高急剧衰减，传到港池的波高有较大幅度的减小。例如，50 a 一遇+极端高水位组合条件下，WNW 向波浪传到渔码头、3 万吨级和 3 000 吨级杂泊位前沿的波高与防波堤堤头波高的比值依次为 0.063、0.076 和 0.077。2) 适当增加进港航道边坡段(卡喉段)长度，对减少港池内波高，改善港池泊稳条件有极佳的效果。

3.2 波浪整体与船舶系泊物模试验结果

根据本工程波浪整体与船舶系泊物模试验^[9]，其结果为：1) 防波堤对 WNW 向波浪掩护效果明显，同时由于航道边坡的折射作用，WSW 和 W 向波浪进入航道后波高有较大幅度的减小。2) 港池内无明显共振现象，同时各码头均无上水现象。3) 各试验船舶在 WSW 向波浪作用下，船舶纵移和横摇相对较大；各试验工况船舶运动量差别不大，设计高水位时运动量略大。4) 各试验设计船型不可作业时间均小于 35 d。

3.3 泥沙物模试验

3.3.1 泥沙物模设计

针对上述挖入式港池布置方案进行了泥沙物模试验^[10], 见图3。



图3 泥沙物模试验

本工程泥沙物理模型平面比尺为1:250, 垂直比尺为1:125。以本工程为中心, 其上下游各约5 km岸滩, 离岸方向至-12 m等高线为精制煤粉铺制的泥沙动床, 满足模拟上下游岸滩冲淤演变的范围要求。

3.3.2 上游岸滩淤积与防波堤挡沙效果

泥沙物模试验表明, 780 m防波堤上游最大淤积点位于堤身处, 岸滩初期淤积较快, 随着时间的推移, 因上游淤积库容逐步向上游方向扩展, 岸滩淤积速率有所减缓。至大约第6 a, 上游岸滩淤积坡脚即将到达防浪堤堤头, 在此之后逐步发生绕沙。随着绕沙的发展, 上游淤积速率进一步减缓, 堤头绕沙在第12 a前后开始影响航道, 能够满足10 a港口使用年限的要求, 2 m等高线变化见图4。

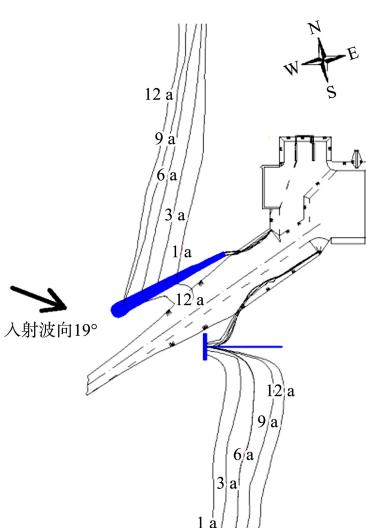


图4 2 m等高线变化

3.3.3 下游岸滩冲刷与T形丁坝防护效果

泥沙物模试验表明, T形丁坝下游最大冲刷点位于丁坝下游300~400 m附近。岸线初期冲刷较快, 随着岸滩冲刷范围逐步向下游扩展, 其后退速率呈减缓趋势。12 a内下游最大冲刷幅度超过400 m。

3.3.4 航道回淤预测

泥沙物模试验表明, 大约6 a后, 上游岸滩淤积坡脚即将到达防波堤堤头, 即6~7 a后逐步出现堤头绕沙, 绕沙首先沿堤头和堤身内侧淤积发展; 至大约第9 a, 绕沙在堤头形成圆弧形淤积棱体; 至大约第11 a, 绕沙在堤身内侧滩地上形成了部分淤积, 未对航道产生明显影响, 上游约第11 a的绕沙情况见图5; 至大约第12 a, 绕沙开始引起航道底部回淤。泥沙物模试验还表明, 11 a内航道底部淤积厚度约0.1 m, 回淤量约700 m³, 因此, 780 m防波堤满足上游挡沙防护需要, 且10 a内航道未见明显淤积, 满足10 a内港口正常运营的要求。

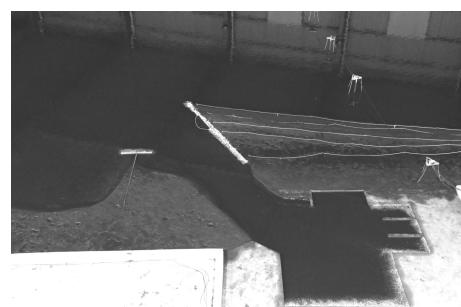


图5 上游约11 a绕沙情况

3.3.5 小结

1) 本工程海域潮汐潮流动力较弱, 近岸波浪破碎掀沙与沿岸流输沙是泥沙运动与岸滩演变的主要动力。

2) 本工程建设后, 上游岸滩初期淤积较快, 随着淤积库容向上游扩展以及堤头绕沙的逐步发展, 淤积速率逐步减缓, 上游淤积型岸滩呈坡度变陡的趋势。下游岸滩初期冲刷较快, 随着冲刷范围逐步向下游发展, 冲刷速率逐步减小, 下游冲刷型岸滩呈坡度变缓的趋势。780 m长的防波堤能够满足10 a港口使用年限的要求。

3)进港航道以南布置丁坝，且丁坝采用 T 形布置形式是必要的。

4)为节省工程投资，最终确定本工程上游防波堤长 780 m。

4 结语

1)在长周期波和沿岸输沙量大等自然条件下，海港工程平面布置采用挖入式港池布置方案，相对于单突堤布置方案，可较好地解决港内泊稳条件差、进港航道和港池淤积重、外海船舶施工风险大等问题。

2)长周期波条件下的挖入式港池方案，其港池通过进港航道与外海连接，所需的防波堤等一般布置在浅水区且长度较小；相对于在外海修建防波堤、在堤内侧布置码头等水工建筑物，可较大幅度地节省工程投资，具有较好的经济性。

3)长周期波条件下的挖入式港池布置方案，经其外海防波堤掩护以及进港航道边坡对进入港池的波浪折射后，波高有较大幅度的减小。适当增加进港航道边坡段(卡喉段)长度，对减少港池内波高，改善港池泊稳条件有极佳的效果。

4)长周期波具有波速大、能量大的特点，对处于外海中施工作业的船舶安全构成极大威胁。挖入式港池布置方案可大幅减少外海船机作业，确保施工安全。

5)长周期波条件下的挖入式港池方案，港池内的水体存在共振的风险，布置时须优化港池水域大小及形状、防波堤布置、口门位置及宽度等，并通过模型试验验证。

6)在西非西海岸建设防波堤，在其长周期波和沿岸输沙量大等自然条件下，可采用防波堤与防沙堤合并建设，以节约工程投资。

7)在西非西海岸建设防波堤，在其单一由北

向南的沿岸大输沙量条件下，呈现防波堤北淤南冲的规律，因此，在防波堤以南适当位置布置 T 形丁坝十分必要，该 T 形丁坝可有效稳定丁坝与进港航道之间的岸滩，减小进港航道淤积并确保码头陆域安全。

参考文献：

- [1] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 非洲某港口项目初步设计[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2017.
- [2] 长江勘测规划设计研究有限责任公司. 非洲某港口项目施工图设计[R]. 武汉: 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 2018.
- [3] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [4] 厉泽逸, 刘均卫. 长周期波大输沙量条件下防波堤设计 [J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(11): 93-94, 113.
- [5] 张翔, 马小舟, 郑振钧, 等. 长周期波浪激发矩形港池多模态共振研究 [J]. 海洋工程, 2019, 37(5): 28-36.
- [6] 吴善翔, 王岗, 郑金海, 等. 美国 Nantucket 岛长周期水波共振特征研究 [C]//中国海洋学会海洋工程分会. 第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下). 北京: 海洋出版社, 2015: 125-133.
- [7] 中交水运规划设计院有限公司, 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港总体设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [8] 南京水利科学研究院. 非洲某港口项目波浪数学模型计算报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2016.
- [9] 南京水利科学研究院. 非洲某港口项目波浪整体与船舶系泊物理模型试验报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2017.
- [10] 南京水利科学研究院. 非洲某港口项目岸滩演变及防护措施泥沙物理模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2017.